

李 敏,刘亚军,王文静,等. 施肥方式对连作甘薯田土壤团聚体稳定性及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(13):252-260.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.13.037

# 施肥方式对连作甘薯田土壤团聚体稳定性及酶活性的影响

李 敏,刘亚军,王文静,胡启国,王红刚,储凤丽

(河南省商丘市农林科学院,河南商丘 476000)

**摘要:**研究施肥措施对连作甘薯田土壤团聚体稳定性及酶活性变化的影响,为豫东地区连作甘薯田有机肥的合理施入提供理论依据。试验设不施肥(CK)、单施化肥(SF)、单施生物有机肥(SBF)、单施缓控释肥(SSF)、50%缓控释肥50%生物有机肥( $SF_{50}BF_{50}$ )、50%化肥配施50%生物有机肥( $F_{50}BF_{50}$ )6个处理,测定了不同施肥处理土壤团聚体组成、稳定性、容重、孔隙度、全土酶活性以及团聚体酶活性等指标。结果表明,与CK相比,化肥、缓控释肥与生物有机肥配施能够提高 $>2\text{ mm}$ 、 $>1\sim2\text{ mm}$ 粒级团聚体质量分数和团聚体GMD、MWD和 $R_{>0.25}$ 值,降低D值;能够提高土壤孔隙度,降低土壤容重。其中, $F_{50}BF_{50}$ 处理土壤容重显著降低6.71%, $SF_{50}BF_{50}$ 、 $F_{50}BF_{50}$ 处理土壤孔隙度分别显著提高7.08%、10.27%;能够提高全土以及团聚体酶活性和 $>2\text{ mm}$ 、 $>1\sim2\text{ mm}$ 粒级团聚体脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性贡献率。其中, $F_{50}BF_{50}$ 处理全土脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性分别显著提高13.58%、16.90%、16.82%, $SF_{50}BF_{50}$ 处理全土碱性磷酸酶活性显著提高10.71%;相关性分析结果显示,土壤酶活性变化与土壤结构及团聚体稳定性变化紧密相连。综上所述,化肥、缓控释肥与生物有机肥配施能够改善土壤结构和团聚体组成,提升团聚体稳定性,提高团聚体酶活性及贡献率。其中,50%化肥配施50%生物有机肥处理表现较好。

**关键词:**施肥;团聚体;容重;孔隙度;酶活性

**中图分类号:**S531.06;S152.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2023)13-0252-09

甘薯是我国重要的粮食作物,因具有产量高、易栽活、营养丰富等特点,在我国具有较大的种植面积<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着甘薯产业升级以及能源作物的开发利用,甘薯需求量逐年递增<sup>[3-4]</sup>。而受耕地面积、轮作倒茬时间限制,广大种植户在保障甘薯产量的前提下,常年连作种植以及大量施用化肥,造成甘薯根际土壤结构改变,养分及酶活性降低,菌群失衡等问题<sup>[5-8]</sup>。且随着施肥时间的延长,连作甘薯田产量下降,品质降低,病虫害频发,严重影响了甘薯产值及产业健康发展<sup>[9-10]</sup>。因此,改善连作甘薯田土壤结构,提高土壤生物学活性等问题迫在眉睫。

土壤团聚体是由较小土壤颗粒胶结而成的粒状或块状结构体,是土壤结构的基本单元,也是土

壤养分的储存库和微生物活动的重要场所,其含量的变化能够直接影响土壤物理结构以及养分供应能力<sup>[11]</sup>。土壤酶是农田土壤的重要组成部分,能够参与土壤中大多数复杂的生物化学过程,是指示土壤肥力和生物学特性的重要指标<sup>[12]</sup>。有研究表明,无机肥与有机肥配施能够改变土壤结构,提高土壤酶活性<sup>[13-15]</sup>。甘雅芬等研究表明,化肥减量与紫云英还田能够改善土壤团聚体粒径分布,促进较大团聚体形成,提高土壤团聚体稳定性<sup>[16]</sup>;聂鑫等研究表明,化肥减量20%配施紫云英30 000 kg/hm<sup>2</sup>还田能够显著促进土壤中 $>1\sim2\text{ mm}$ 、 $0.5\sim1\text{ mm}$ 粒级团聚体形成,提高土壤团聚体稳定性,但随着紫云英还田量增加, $>2\text{ mm}$ 粒级团聚体比例及团聚体稳定性降低<sup>[17]</sup>;张帅等研究表明,与单施化肥或生物炭相比,化肥减量配施生物炭能够显著提高 $>2\text{ mm}$ 、 $>0.25\sim2\text{ mm}$ 、 $0.053\sim0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体相关碳转化酶活性,降低 $>0.25\sim2\text{ mm}$ 、 $0.053\sim0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体微生物熵<sup>[18]</sup>;李委涛等研究表明,化肥与有机肥配施能够显著提高土壤团聚体平均当量直径,增加土壤酶活性,改善土壤团聚体粒

收稿日期:2023-02-23

基金项目:国家甘薯产业技术体系建设专项(编号:CARS-10)。

作者简介:李 敏(1984—),女,河南商丘人,硕士,副研究员,主要从事甘薯新品种选育及栽培工作。E-mail:limin039671@163.com。

通信作者:胡启国,硕士,副研究员,主要从事甘薯新品种选育及利用工作。E-mail:huqiguol234@126.com。

径结构,提高土壤生产力土壤<sup>[19]</sup>。

缓控释肥能够根据作物需肥特性调控施肥,具有肥效长、肥效高等优点,能够实现简化施肥,省时省力<sup>[20]</sup>。生物有机肥含有丰富的营养物质和功能菌群,施入土壤中能够改善微生态环境,促进微生物繁殖,提高土壤微生物活性<sup>[21]</sup>。当前,缓控释肥、生物有机肥在玉米、水稻方面的研究有很多,在甘薯方面的研究相对较少,而关于化肥、缓控释肥与生物有机肥配施对甘薯田土壤团聚体酶活性影响方面的研究更是未见报道<sup>[22-24]</sup>。因此,本研究通过化肥、缓控释肥减量与生物有机肥配施,探究连作甘薯田土壤团聚体粒径分布、稳定性、容重、孔隙度、酶活性及团聚体酶活性贡献率的变化规律,找到适宜的施肥模式,旨在为豫东地区连作甘薯田有机肥的合理施入提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2020—2022 年在河南省商丘市梁园区双八镇朱庄村(116°37' E, 39°93' N)进行。试验区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均温度 14.2℃,年均降水量 675 mm,其中约 80% 降水量集中在 6—9 月,无霜期 212 d,年日照时数 2 200 h。供试土壤为黄潮土黏土质,基础土壤(0~20 cm)理化性质:含全氮 0.92 g/kg、全磷 0.65 g/kg、速效钾 123.37 mg/kg、碱解氮 54.69 mg/kg、速效磷 37.68 mg/kg、有机质 11.26 g/kg, pH 值为 8.02。试验地块平整,便于排灌,常年小麦—甘薯轮作种植。

### 1.2 供试材料

供试品种:商薯 18(商丘市农林科学院生物研究所);商麦 167(商丘市农林科学院国家农作物区试站)。

供试肥料,复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 10%、10%、20%,河南亿丰年生物科技有限公司);缓控释肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 18%、9%、18%,湖北金峰农业科技有限公司);生物有机肥(芽孢杆菌≥0.5 亿 CFU/g,黄腐酸含量≥12%,有机质含量≥40%,山东泉林嘉有机肥料有限责任公司)。

### 1.3 试验设计

试验地种植制度常年冬季种植小麦,夏季种植甘薯。小麦季施肥不做特殊处理,按照当地种植习惯进行,甘薯季采用不同施肥措施处理。试验设不

施肥(CK)、单施化肥(SF)、单施生物有机肥(SBF)、单施缓控释肥(SSF)、50%缓控释肥 50%生物有机肥(SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>)、50%化肥配施 50%生物有机肥(F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>)6 个处理,各处理重复 3 次,共 18 个小区,随机区组排列。小区面积为 56 m<sup>2</sup>,甘薯株行距为 0.28 m×0.8 m,走道 0.8 m,保护行 3.0 m。单施化肥、缓控释肥、生物有机肥用量分别为 750、750、1 200 kg/hm<sup>2</sup>。不同施肥处理肥料均作为基肥在旋耕起垄前一次性施入,生育期内不进行追肥。小麦秸秆、甘薯地上部植株均通过粉碎机直接还田。其他田间种植、管理措施按照本地习惯进行,不做特殊处理。小麦生育期 10 月 20 日至翌年 6 月 8 日,甘薯生育期 6 月 15 日至 10 月 15 日。

### 1.4 样品采集与项目测定

样品采集与处理。于 2022 年甘薯收获前 1 周通过螺旋土钻利用五点取样法采集 0~30 cm 土壤样品,混匀后带回实验室。检出根系、碎石等杂物后,将土壤样品分成 2 个部分,一部分摊开自然风干,用于全土酶活性指标的测定;另一部分沿其土壤结构轻轻剥开,尽量避免土块因外力发生形变,自然风干后用于土壤团聚体组成、团聚体酶活性等指标的测定。在用土钻采集样品的同时,利用环刀在每个小区内采集 0~20 cm 环刀样品 1 份,用于土壤容重、孔隙度指标的测定。

测试项目与方法。土壤脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性分别采用苯酚钠比色法、高锰酸钾滴定法、磷酸苯二钠比色法和 3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[25]</sup>测定。土壤容重、孔隙度均采用环刀法<sup>[26]</sup>测定。土壤团聚体组成采取干筛法测定<sup>[27]</sup>。然后分别测定粒径>2 mm、>1~2 mm、>0.25~1 mm、0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 团聚体质量,用于土壤团聚体稳定性指标计算。土壤团聚体稳定性及酶活性贡献率计算公式<sup>[28-29]</sup>如下:

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n m_i}\right);$$

$$D = 3 - \frac{\lg\left[\frac{W(\delta < \bar{X}_i)}{W_i}\right]}{\lg\left(\frac{\bar{X}_i}{X_{\max}}\right)};$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \cdot \bar{W}_i;$$

$$R_{>0.25} = m_{>0.25}/m_i;$$

团聚体贡献率 = (某粒级团聚体酶活性 × 某粒级团聚体质量分数) / 全土酶活性 × 100%。

式中:  $MWD$  为团聚体平均质量直径;  $D$  为分形维数;  $GMD$  为几何平均直径;  $R_{>0.25}$  为粒径  $>0.25$  mm 团聚体质量分数;  $m_i$  为  $i$  粒径团聚体质量;  $\bar{X}_i$  为  $i$  粒径团聚体平均直径;  $X_{max}$  为最大粒径团聚体平均直径;  $W_i$  为  $i$  粒径团聚体质量占比;  $W(\delta < \bar{X}_i)$  为  $< \bar{X}_i$  粒径团聚体质量占比;  $m_i$  为团聚体总质量。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2018 进行原始数据整理与计算, 采用 SPSS 19.0 进行方差分析与相关性分析。其中, 不同处理间差异显著性采用新复极差法进行检验 ( $\alpha = 0.05$ )。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤团聚体粒径分布特征的影响

由表 1 可知, 连续 3 年不同施肥处理条件下土壤各粒级团聚体质量分数表现出明显差异。与 CK

相比, SBF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理  $>2$  mm 粒级团聚体质量分数分别显著提高 11.95%、8.36%、15.21%, SF、SSF 处理无显著性变化。其中, 不同施肥处理间 F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理最大, 显著高于 SF、SSF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理; SBF、SSF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理  $>1 \sim 2$  mm 粒级团聚体质量分数较 CK 分别显著提高 15.61%、8.89%、9.49%、13.74%, SF 处理无显著性变化。其中, 不同施肥处理间 SBF 处理最大, 显著高于 SF、SSF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理; SBF、SSF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理  $>1 \sim 2$  mm 粒级团聚体质量分数较 CK 分别显著降低 6.24%、5.95%、12.64%、11.89%, SF 处理无显著性变化。其中, SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理显著低于其他施肥处理。与 CK 相比, 不同施肥处理 0.053 ~ 0.25 mm 粒级团聚体质量分数显著降低 13.72% ~ 20.42%。其中, F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理最小, 显著低于 SF、SBF 处理。SBF、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理 0.053 mm 粒级团聚体质量分数较 CK 分别显著降低 28.48%、21.68%, 其他施肥处理均无显著性变化。

表 1 不同施肥处理条件下土壤各粒级团聚体质量分数的变化

| 处理                                | 各粒级团聚体质量分数(%)  |                |                   |                      |                |
|-----------------------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------------|----------------|
|                                   | $>2$ mm        | $>1 \sim 2$ mm | $>0.25 \sim 1$ mm | $0.053 \sim 0.25$ mm | $<0.053$ mm    |
| CK                                | 34.32 ± 1.20c  | 20.24 ± 0.83c  | 17.32 ± 0.86a     | 12.39 ± 1.01a        | 15.73 ± 0.52ab |
| SF                                | 35.41 ± 2.15c  | 21.11 ± 1.18bc | 16.95 ± 0.92ab    | 10.57 ± 0.72b        | 15.96 ± 0.70ab |
| SBF                               | 38.42 ± 1.84ab | 23.40 ± 1.57a  | 16.24 ± 1.06b     | 10.69 ± 0.53b        | 11.25 ± 0.61d  |
| SSF                               | 35.24 ± 1.59c  | 22.04 ± 0.97b  | 16.29 ± 0.88b     | 10.24 ± 0.42bc       | 16.19 ± 0.49a  |
| SF <sub>50</sub> BF <sub>50</sub> | 37.19 ± 2.24b  | 22.16 ± 1.01b  | 15.13 ± 0.97c     | 10.31 ± 0.59bc       | 15.21 ± 0.69b  |
| F <sub>50</sub> BF <sub>50</sub>  | 39.54 ± 1.63a  | 23.02 ± 0.84ab | 15.26 ± 0.58c     | 9.86 ± 0.50c         | 12.32 ± 0.82c  |

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达到显著性水平 ( $P < 0.05$ )。下同。

2.2 不同施肥处理对土壤团聚体稳定性的影响

不同施肥处理土壤团聚体稳定性变化见表 2。与 CK 相比, 其他施肥处理土壤团聚体几何平均直径 ( $GMD$ )、平均质量直径 ( $MWD$ )、 $>0.25$  mm 粒级团聚体质量分数 ( $R_{>0.25}$ ) 均不同程度提高, 分形维数 ( $D$ ) 均降低。其中, F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理  $GMD$  值最大, 较 CK、SF、SSF 处理分别显著提高 10.48%、7.87%、7.03%, 与其他处理相比无显著性差异。SBF 处理  $GMD$  值次之, 但也均显著高于 CK、SF、SSF 处理。SBF 处理  $MWD$  值、 $R_{>0.25}$  值均最大, 较 CK、SF、SSF 处理分别显著提高 11.89%、7.81%、5.61% 和 8.60%、6.25%、6.08%, 与 F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理相比均无显著性差异。与 CK 相比, 不同施肥处理  $D$  值均降低, 但均无显著性差异, 不同施肥处理间也均无显著性

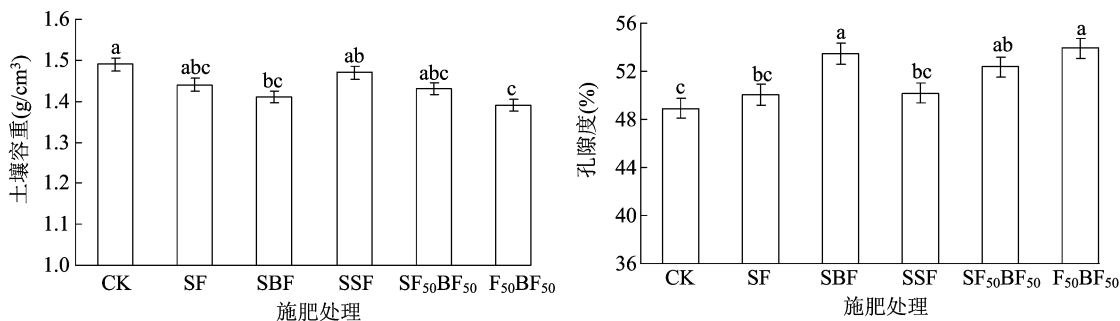
差异。

2.3 不同施肥处理对土壤容重与孔隙度的影响

不同施肥处理土壤容重与孔隙度变化见图 1。与 CK 相比, 不同施肥处理土壤容重降低, 孔隙度增加。其中, SBF、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理土壤容重较 CK 分别显著降低 5.37%、6.71%, 其他施肥处理土壤容重均无显著性变化。不同施肥处理间 F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理土壤容重最低, 较 SSF 处理显著降低 5.44%, 与其他处理相比均无显著性差异。SBF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理土壤孔隙度较 CK 分别显著提高 9.37%、7.08%、10.27%, SF、SSF 处理土壤孔隙度无显著性变化。不同施肥处理间 F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理土壤孔隙度最大, 较其他施肥处理增加 0.82% ~ 7.71%, 显著高于 SF、SSF 处理。

表 2 不同施肥处理条件下土壤团聚体稳定性的变化

| 处理                                | 几何平均直径<br>(mm) | 平均质量直径<br>(mm) | >0.25 mm 粒级<br>团聚体质量分数(%) | 分形维数         |
|-----------------------------------|----------------|----------------|---------------------------|--------------|
| CK                                | 1.24 ± 0.06c   | 1.85 ± 0.08c   | 71.88 ± 4.39b             | 2.49 ± 0.15a |
| SF                                | 1.27 ± 0.09bc  | 1.92 ± 0.12bc  | 73.47 ± 5.10b             | 2.46 ± 0.19a |
| SBF                               | 1.35 ± 0.08a   | 2.07 ± 0.08a   | 78.06 ± 5.29a             | 2.40 ± 0.12a |
| SSF                               | 1.28 ± 0.14bc  | 1.96 ± 0.16b   | 73.57 ± 4.49b             | 2.44 ± 0.24a |
| SF <sub>50</sub> BF <sub>50</sub> | 1.31 ± 0.06ab  | 1.99 ± 0.10ab  | 74.48 ± 6.21ab            | 2.43 ± 0.17a |
| F <sub>50</sub> BF <sub>50</sub>  | 1.37 ± 0.11a   | 2.06 ± 0.15a   | 77.82 ± 4.27a             | 2.38 ± 0.26a |



图柱上不同小写字母表示处理间差异达到显著性水平( $P < 0.05$ )。下同

图1 不同施肥处理条件下土壤容重与孔隙度的变化

#### 2.4 不同施肥处理对全土酶活性的影响

不同施肥处理土壤全土酶活性变化见图2。与CK相比,SBF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理土壤脲酶活性分别显著提高9.88%、7.41%、13.58%,SF、SSF处理无显著性变化。其中,F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理脲酶活性最高,较其他施肥处理提高5.75%~10.84%,显著高于除SBF处理外的其他施肥处理。与CK相比,SF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理土壤碱性磷酸酶活性分别显著提高5.36%、10.71%、9.82%,SF、SBF处理无显著性变化。其中,SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理碱性磷酸酶活性最高,但与F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理相比无显著性差异。不同施肥处理土壤过氧化氢酶、蔗糖酶活性较CK分别显著提高6.90%~16.90%、5.42%~16.82%。其中,F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理过氧化氢酶、蔗糖酶活性均最高,过氧化氢酶活性较SF、SBF、SSF处理分别显著提高6.96%、9.03%、8.33%,蔗糖酶活性较SF、SSF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理分别显著提高10.81%、6.40%、8.97%。SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理过氧化氢酶与SBF处理蔗糖酶活性次之,与F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理相比均无显著性差异。

#### 2.5 不同施肥处理对土壤团聚体酶活性的影响

不同施肥处理各粒级团聚体酶活性变化见图3。与CK相比,不同施肥处理各粒级团聚体脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性均有所提高。

其中,F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理>2 mm、>1~2 mm、>0.25~1 mm、<0.053 mm粒级团聚体脲酶活性最高,较CK分别显著提高16.05%、13.68%、16.09%、22.67%,显著高于SF、SBF、SSF处理;SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理活性次之,除<0.053 mm粒级活性显著低于F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理外,其他粒级均无显著性差异。SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理0.053~0.25 mm粒级团聚体脲酶活性最高,较CK显著提高14.10%,显著高于除F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理外的其他处理,F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理活性次之。

图3中F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理>2 mm、>1~2 mm、>0.25~1 mm、<0.053 mm粒级团聚体碱性磷酸酶活性最高,较CK分别显著提高14.15%、26.36%、14.05%、20.20%;>2 mm、>1~2 mm粒级活性显著高于SF、SBF、SSF处理,>0.25~1 mm、<0.053 mm粒级活性显著高于其他处理;SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理>2 mm、>1~2 mm、<0.053 mm粒级和SBF处理>0.25~1 mm粒级活性次之。SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理0.053~0.25 mm粒级团聚体碱性磷酸酶活性最高,较CK显著提高9.17%,显著高于SF、SSF处理,F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理活性次之。

图3中F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>处理>1~2 mm、>0.25~1 mm、0.053~0.25 mm粒级团聚体过氧化氢酶活性最高,较CK分别显著提高16.85%、19.02%、

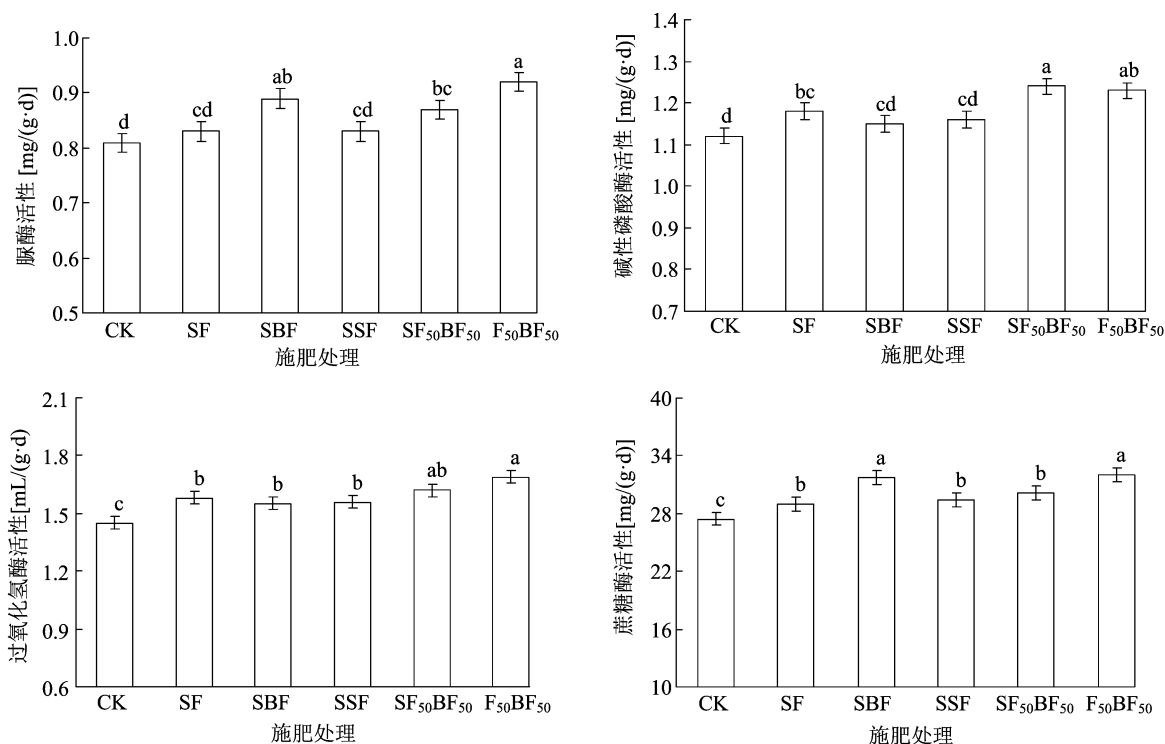


图2 不同施肥处理条件下土壤全土酶活性的变化

21.99%, 显著高于 SF、SBF、SSF 处理; SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理活性次之。SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理 >2 mm、<0.053 mm 粒级过氧化氢酶活性最高, 较 CK 分别显著提高 21.58%、13.53%, 显著高于 SF、SBF、SSF 处理, F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理活性次之。

图 3 中 F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理 >2 mm、>1~2 mm 粒级团聚体蔗糖酶活性均最高, 较 CK 分别显著提高 21.41%、16.81%。>2 mm 粒级活性显著高于 SF、SBF、SSF 处理, >1~2 mm 粒级活性显著高于 SF、SSF、SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理; SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理 >2 mm 粒级与 SBF >1~2 mm 粒级活性次之。SBF 处理 >0.25~1 mm、0.053~0.25 mm、<0.053 mm 粒级蔗糖酶活性最高, 较 CK 分别显著提高 15.76%、10.51%、12.07%, 显著高于 SF、SBF、SSF 处理, F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理蔗糖酶活性次之。

## 2.6 不同施肥措施条件下土壤各粒级团聚体对酶活性的贡献率变化

不同施肥处理土壤各粒级团聚体对土壤酶活性贡献率的变化见图 4。与 CK 相比, 不同施肥处理 >2 mm、>1~2 mm 粒级团聚体对各种酶活性的贡献率均有所提高, 0.053~0.25 mm 粒级团聚体对各种酶活性的贡献率以及 >0.25~1 mm、<0.053 mm 粒级团聚体对过氧化氢酶、蔗糖酶活性的贡献率均有

所降低, >0.25~1 mm、<0.053 mm 粒级团聚体对脲酶、碱性磷酸酶活性的贡献率表现出不同的变化。其中, SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理 >2 mm 与 >1~2 mm 粒级团聚体对脲酶、蔗糖酶活性的贡献率最高, 较 CK 分别显著提高 18.39%、22.10% 与 18.96%、14.98%; F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理 >2 mm 粒级团聚体对碱性磷酸酶的贡献率最高, 较 CK 分别显著提高 19.77%、19.48%, 除 SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理 >1~2 mm 粒级团聚体对碱性磷酸酶活性的贡献率显著低于 F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理外, 其他 SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理指标与 F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理均无显著性差异。而 SF<sub>50</sub>BF<sub>50</sub>、F<sub>50</sub>BF<sub>50</sub> 处理 >0.25~1 mm、0.053~0.25 mm、<0.053 mm 粒级团聚体对各种酶活性的贡献率较 CK 均有所降低。整体来看, >2 mm 粒级团聚体对脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性的贡献率最高, 可达 30.15%~40.63%; 其次为 >1~2 mm 粒级团聚体, 达到 20.96%~30.51%; 0.053~0.25 mm 粒级团聚体酶活性贡献率最低, 仅为 9.14%~12.23%。

## 2.7 土壤酶活性与土壤结构指标及团聚体稳定性的相关性分析

不同施肥处理条件下土壤酶活性与土壤结构指标及团聚体稳定性的相关性分析见表 3。脲酶、蔗糖酶与孔隙度、团聚体稳定性 GMD 值、MWD 值、

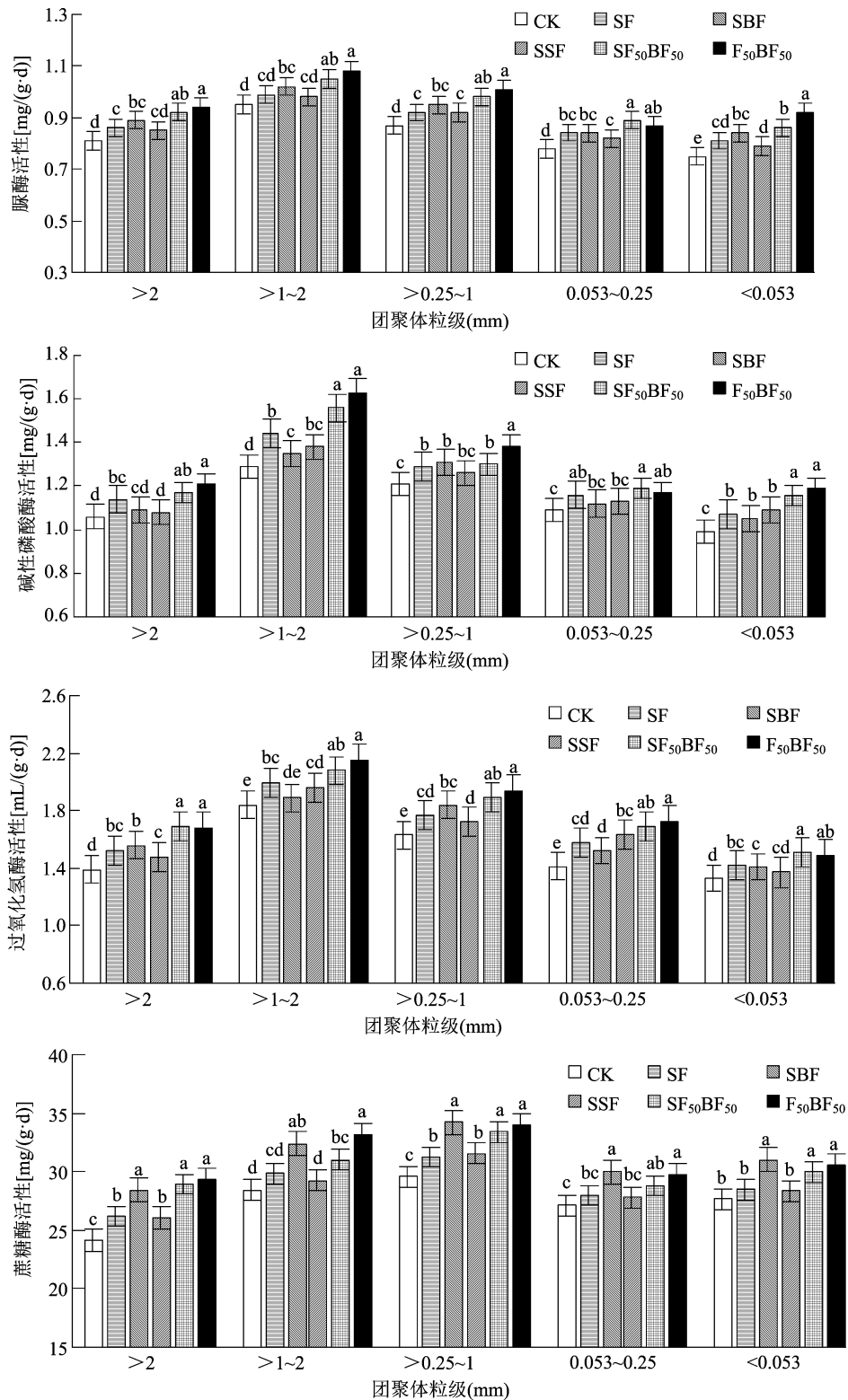


图3 不同施肥处理条件下土壤各粒级团聚体酶活性的变化

$R_{>0.25}$  值呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与容重、 $D$  值呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); 碱性磷酸酶与孔隙度、 $GMD$  值、 $MWD$  值、 $R_{>0.25}$  值呈正相关, 与容重、 $D$  值呈负相关; 过氧化氢酶与孔隙度、 $GMD$  值、 $MWD$  值、

$R_{>0.25}$  值呈正相关, 与容重、 $D$  值呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。由此可见, 土壤酶活性变化与土壤结构及团聚体稳定性变化紧密相连, 说明不同施肥措施可以通过改善土壤物理结构, 提升团聚体稳定性来促

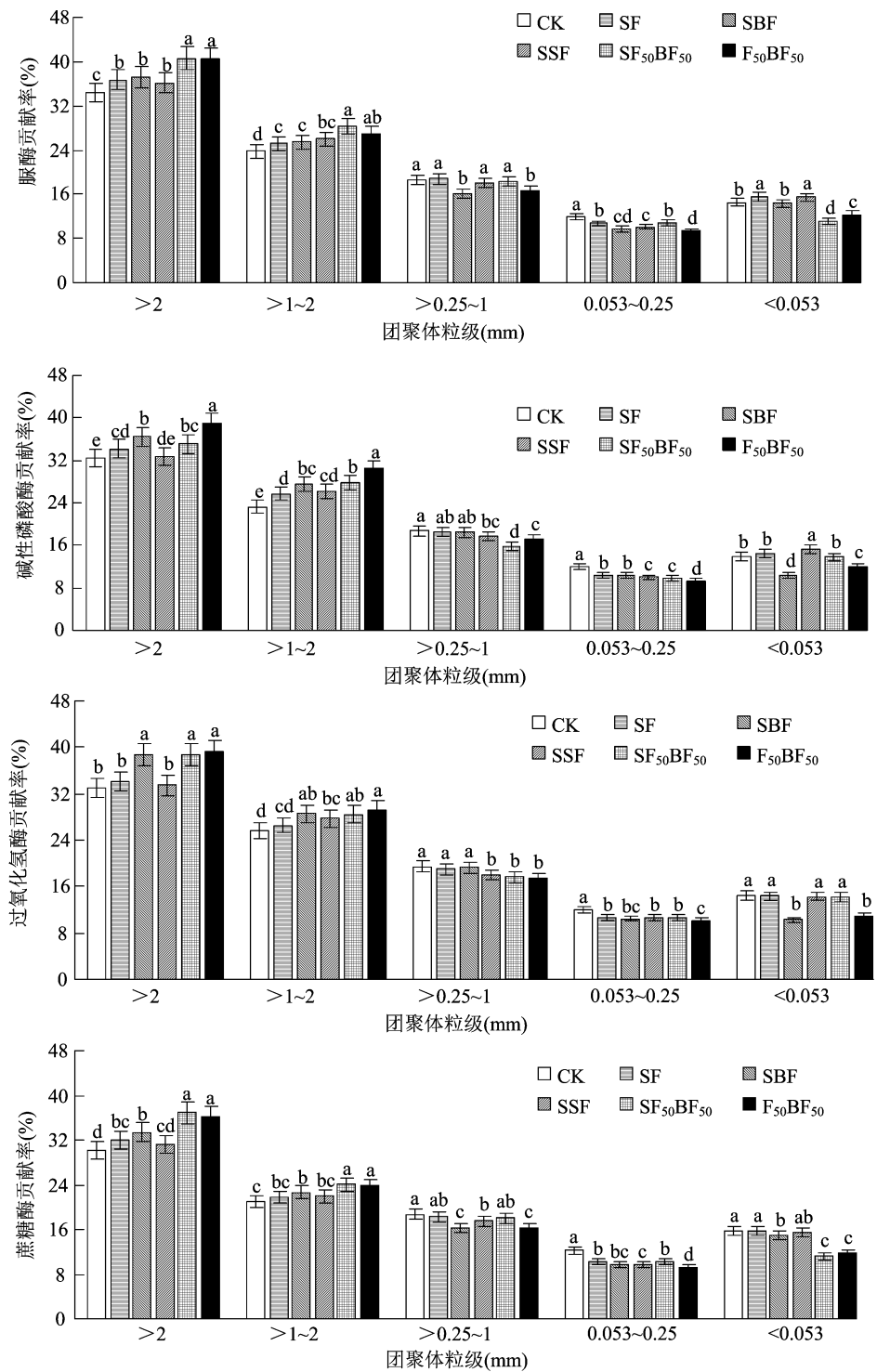


图4 不同施肥处理条件下土壤各粒级团聚体对土壤酶活性贡献率的变化

进土壤相关酶活性的提高。

### 3 讨论与结论

3.1 施肥措施对土壤团聚体、容重及孔隙度的影响

土壤团聚体粒径分布变化不仅能够调控土壤养分供应,还能够改变土壤结构与组成<sup>[30]</sup>。长期施

肥对土壤团聚体组成及稳定性具有一定的影响,有研究表明,长期施用有机肥能够促进土壤大粒径团聚体形成<sup>[31]</sup>。但也有研究表明,外源有机物的摄入对土壤团聚体组成的影响并不显著,甚至能够导致土壤团聚体稳定性降低<sup>[32]</sup>。本研究结果表明,化肥、缓控释肥配施生物有机肥或单施生物有机肥能够

表 3 不同施肥处理条件下土壤酶活性与土壤结构指标及团聚体稳定性的相关性分析

| 指标     | 相关系数     |         |         |          |          |          |          |          |          |      |
|--------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
|        | 脲酶       | 碱性磷酸酶   | 过氧化氢酶   | 蔗糖酶      | 容重       | 孔隙度      | 几何平均直径   | 平均质量直径   | 大粒径团聚体   | 分形维数 |
| 碱性磷酸酶  | 0.64     | 1.00    |         |          |          |          |          |          |          |      |
| 过氧化氢酶  | 0.78 *   | 0.91 ** | 1.00    |          |          |          |          |          |          |      |
| 蔗糖酶    | 0.96 **  | 0.55    | 0.76 *  | 1.00     |          |          |          |          |          |      |
| 容重     | -0.95 ** | -0.67   | -0.82 * | -0.93 ** | 1.00     |          |          |          |          |      |
| 孔隙度    | 0.98 **  | 0.61    | 0.74    | 0.97 **  | -0.94 ** | 1.00     |          |          |          |      |
| 几何平均直径 | 0.99 **  | 0.57    | 0.75    | 0.99 **  | -0.94 ** | 0.99 **  | 1.00     |          |          |      |
| 平均质量直径 | 0.93 **  | 0.51    | 0.71    | 0.99 **  | -0.89 ** | 0.96 **  | 0.97 **  | 1.00     |          |      |
| 大粒径团聚体 | 0.94 **  | 0.40    | 0.63    | 0.97 **  | -0.92 ** | 0.95 **  | 0.98 **  | 0.96 **  | 1.00     |      |
| 分形维数   | -0.96 ** | -0.58   | -0.79 * | -0.99 ** | 0.91 **  | -0.96 ** | -0.99 ** | -0.98 ** | -0.95 ** | 1.00 |

注: \*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

提高土壤  $>2\text{ mm}$ 、 $>1\sim2\text{ mm}$  粒级团聚体质量分数以及团聚体  $GMD$ 、 $MWD$  和  $R_{>0.25}$  值,降低  $D$  值;能提高土壤孔隙度,降低土壤容重。这与李锐等的研究<sup>[33]</sup>较为一致。分析其原因可能是外源有机物的摄入能够为土壤较小颗粒的团聚提供较多的胶结物质,且外源有机物的摄入能够为土壤根际微生物的活动提供较多的碳源,进而增强其代谢活性产生较多的代谢胶结产物,促使大粒径团聚体形成,提高土壤团聚体稳定性和土壤孔隙度,降低土壤容重,从而改善土壤结构<sup>[34-35]</sup>。而不同生物有机肥处理间的差异可能是由外源有机物的摄入量引起,也可能是无机肥与有机肥配施前期更宜满足作物根系吸收利用,从而促进养分转化与分解,产生更多的胶结物质,进而有利于大颗粒团聚体形成<sup>[36]</sup>。

### 3.2 施肥措施对土壤团聚体酶活性及贡献率的影响

土壤酶活性受田间耕作方式、施肥措施影响较大,有研究表明,施肥措施能够显著影响农田土壤酶活性变化<sup>[37-39]</sup>。本研究结果表明,与对照不施肥处理相比,各施肥处理均能够提高土壤全土酶和团聚体脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性。其中,生物有机肥处理明显高于化肥或缓控释肥单施处理。分析其原因可能是外源有机物的摄入,为土壤微生物生命代谢活动提供丰富的营养物质和益生菌,且有机物的摄入有利于提高土壤孔隙度,降低土壤容重,能够改善土壤微生态环境,提高微生物代谢水平,促进根系对土壤养分的吸收与利用,从而提高土壤酶活性以及团聚体酶活性<sup>[40]</sup>。本研究中,与对照不施肥或单施化肥/生物有机肥/缓

控施肥处理相比,化肥、缓控释肥与生物有机肥配施能够提高  $>2\text{ mm}$ 、 $>1\sim2\text{ mm}$  粒级团聚体脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性贡献率。分析其原因可能是较大粒级团聚体含有较多的有机碳,为酶促反应提供更多的载体,使得大粒级团聚体的酶促反应效率高于小粒级团聚体<sup>[19]</sup>。土壤不同粒级团聚体酶活性的差异,表明团聚体粒级对土壤酶活性的贡献率与其组分有较大关系。而不同施肥处理条件下土壤酶活性与土壤容重、孔隙度及团聚体稳定性的相关分析表明,土壤酶活性的变化与土壤物理结构及团聚体稳定性密切相关。说明合理施肥措施能够通过改善土壤物理结构与团聚体组成,提升团聚体稳定性来促进土壤酶活性的提高。

经过 3 年定位试验发现,与对照不施肥处理相比,化肥、缓控释肥与生物有机肥配施能够提高  $>2\text{ mm}$ 、 $>1\sim2\text{ mm}$  粒级团聚体质量分数和团聚体  $GMD$ 、 $MWD$  和  $R_{>0.25}$  值,降低  $D$  值;能够提高土壤孔隙度,降低土壤容重;能够提高全土酶以及团聚体酶活性和  $>2\text{ mm}$ 、 $>1\sim2\text{ mm}$  粒级团聚体脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性贡献率。综合土壤团聚体、容重、孔隙度及酶活性方面结果,50% 化肥配施 50% 生物有机肥处理整体表现优于 50% 缓控释肥配施 50% 生物有机肥处理。

### 参考文献:

- [1] 马仁罡,孙健英,李宗芸. 基于生物信息学的甘薯基因组学等研究进展[J]. 江苏农业学报,2021,37(2):531-538.
- [2] 刘亚军,胡启国,储凤丽,等. 不同栽培模式对甘薯干物质分配及产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2018,30(6):1-7,18.



- [3]王 欣,李 强,曹清河,等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学,2021,54(3):483-492.
- [4]李 强,赵 海,靳艳玲,等. 中国甘薯产业助力国家粮食安全的分析与展望[J]. 江苏农业学报,2022,38(6):1484-1491.
- [5]兰孟焦,张 辉,肖满秋,等. 不同施肥处理对甘薯产量及土壤肥力与氮素利用的影响[J]. 西北农业学报,2023,32(1):44-52.
- [6]张伟彬. 有机肥和化肥配施对小麦甘薯轮作土壤腐殖质结合形态及微生物群落结构的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(17):247-252.
- [7]段文学,张海燕,解备涛,等. 化肥和生物有机肥配施对鲜食型甘薯块根产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(11):1971-1980.
- [8]刘亚军,王文静,李 敏,等. 无机肥与有机肥配施对甘薯土壤养分变化及微生物碳代谢功能的影响[J]. 河南农业科学,2022,51(7):75-84.
- [9]王 佳,严 伟,纪 要,等. 甘薯施肥施药机械研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2021,42(9):68-76.
- [10]张 辉,张永春. 肥料对甘薯营养品质影响的研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(17):1-5.
- [11]朱长伟. 轮耕模式对豫北潮土土壤肥力及作物产量的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2021.
- [12]秦俊梅,李嘉欣,宋建丽,等. 不同修复基质对外源四环素污染土壤酶活性及微生物量碳氮的影响[J]. 应用与环境生物学报,2021,27(6):1500-1508.
- [13]吴强建,胡梦蝶,侯松峰,等. 减氮配施生物炭基肥对蜜柚土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 河南农业大学学报,2022,56(5):732-741.
- [14]刘寒冬,崔纪菡,刘 猛,等. 有机肥替代部分化肥对谷子产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(7):71-81.
- [15]杨文飞,杜小凤,顾大路,等. 长期施肥对根系及土壤微生态环境、养分和结构的影响综述[J]. 江西农业学报,2020,32(12):37-44.
- [16]甘雅芬,徐永昊,周富忠,等. 紫云英还田与氮肥减施对水稻土团聚体中各形态铁锰含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(7):1238-1248.
- [17]聂 鑫,鲁艳红,廖育林,等. 化肥减施下紫云英不同翻压量对水稳性团聚体及双季稻产量的影响[J]. 华北农学报,2020,35(6):155-164.
- [18]张 帅,成宇阳,吴 行,等. 生物炭施用下潮土团聚体微生物量碳氮和酶活性的分布特征[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(3):369-379.
- [19]李委涛,李忠佩,刘 明,等. 秸秆还田对瘠薄红壤水稻土团聚体内酶活性及养分分布的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(20):3886-3895.
- [20]李 敏,刘亚军,王文静,等. 不同施肥模式对小麦—甘薯轮作田土壤性质及甘薯生长发育的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):250-256.
- [21]刘拴成. 有机肥与无机肥配施对马铃薯生长发育及产质量的影响[J]. 河南农业科学,2020,49(3):32-39.
- [22]韩正砥,周明耀,杨雅琴,等. 生物有机肥配施对节水灌溉稻田养分累积及水稻生长的影响[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(4):210-216.
- [23]王 静,王 磊,刘耀斌,等. 长期施用不同有机肥对甘薯产量和土壤生物性状的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(2):184-192.
- [24]赵 营,刘晓彤,罗健航,等. 缓/控释肥条施对春玉米产量、吸氮量与氮平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(5):34-39.
- [25]关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986:64-126.
- [26]刘小粉,刘春增,贾萌萌,等. 化肥减施条件下紫云英翻压量对土壤物理特性和水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(16):67-73.
- [27]张玉铭,胡春胜,陈素英,等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报,2021,29(9):1558-1570.
- [28]孙 雪,张玉铭,张丽娟,等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报,2021,29(8):1384-1396.
- [29]隋夕然,吴丽芳,王 妍,等. 滇中岩溶高原不同石漠化程度土壤团聚体养分及酶活性特征[J]. 浙江农林大学学报,2022,39(1):115-126.
- [30]林洪羽,周明华,张博文,等. 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报,2020,28(1):96-103.
- [31]刘希玉,王忠强,张心昱,等. 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响[J]. 生态学报,2013,33(16):4949-4955.
- [32]叶丽丽,王翠红,周 虎,等. 添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J]. 土壤,2012,44(1):62-66.
- [33]李 锐,陶 瑞,王 丹,等. 减氮配施有机肥对滴灌棉田土壤生物学性状与团聚体特性的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(10):3297-3304.
- [34]席凯鹏,杨苏龙,席吉龙,等. 长期棉花秸秆配施有机肥对土壤理化性质及棉花产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(7):82-90.
- [35]王西和,杨金钰,王彦平,等. 长期施肥措施下灰漠土有机碳及团聚体稳定性特征[J]. 中国土壤与肥料,2021(6):1-8.
- [36]王 威,吴大付,唐 蛟,等. 秸秆全量还田下沼液替代化肥对潮土团聚体及结合有机碳的影响[J]. 土壤通报,2022,53(4):847-857.
- [37]胡庆兰,杨 凯,王金贵,等. 地膜覆盖及不同施肥处理对玉米产量和根际土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(21):122-126.
- [38]周东兴,李 磊,李 晶,等. 玉米/大豆轮作下不同施肥处理对土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2018,37(6):1856-1864.
- [39]胡哲伟,金 淑,应蓉蓉,等. 蚓粪和益生菌配施对土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(11):201-207.
- [40]李 娜,韩晓增,尤孟阳,等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. 生态环境学报,2013,22(9):1625-1632.